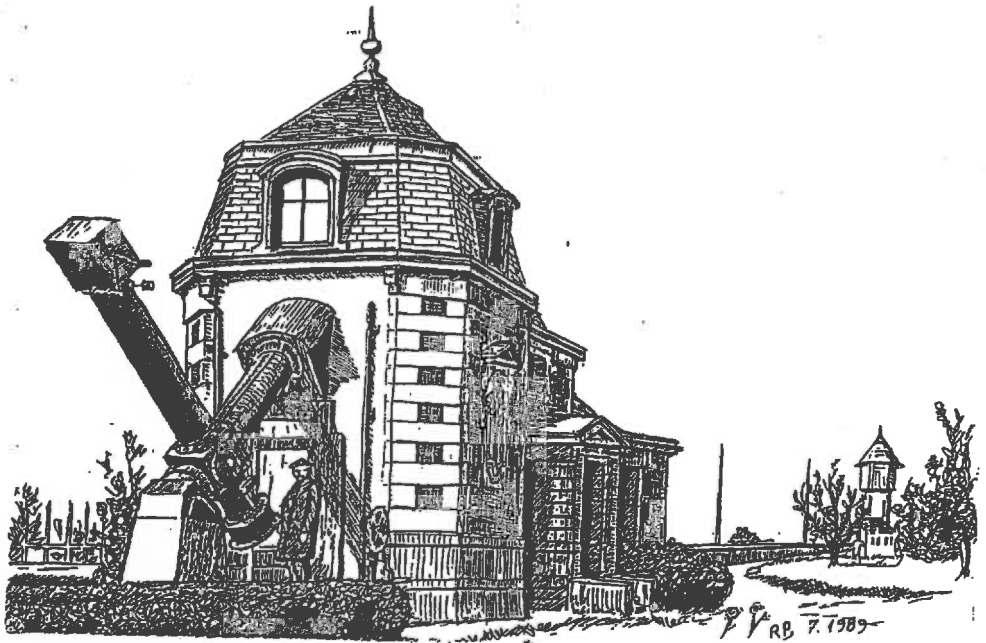


Société de L'astronomie de Lyon



No 31 – 1991

TABLE DES MATIERES

=====

	Page
<u>LES SUPERNOVAE</u>	2
Par M ^r D.SONDAZ.	
<u>FRED HOYLE</u>	16
La théorie de l'Univers stationnaire	
Par le groupe d'études de la S.A.L.	
<u>NOTES DE LECTURE</u>	19
Par M ^r D.SONDAZ.	

LES SUPERNOVAE

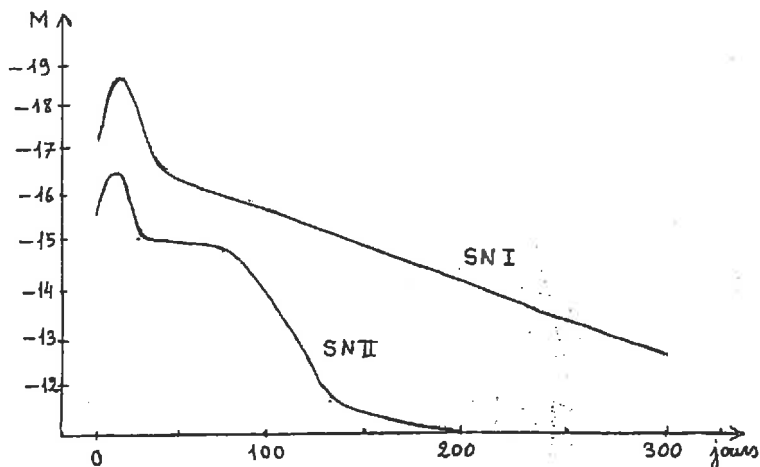
Conférence faite le 3 mars 1990 par Daniel SONDAZ

"Dépasse Orion; plus avant
Enfonce-toi; frémis au vent
De quelque étoile dilatée,
Monstre lointain au coeur mouvant"

Léon Dierx, Poésies complètes, 1890.

L'observation des supernovae - Une supernova apparaît comme une étoile dont l'éclat croît brusquement, pouvant devenir jusqu'à près de dix milliards de fois plus lumineuse que le Soleil.

Dès 1926, Baade et Zwicky ont recherché les supernovae dans les galaxies extérieures à la nôtre (la dernière à avoir été observée dans la nôtre l'a été au XVII^{ème} siècle). Baade, Minkowski et Zwicky ont classé en 1930 les supernovae en deux types: les supernovae de type I (SNI) et les supernovae de type II (SNII).



Courbes de lumière des SNI et des SNII.

Les supernovae des types I et II se distinguent d'abord par l'aspect de leur courbe de lumière comme le montre la figure. Au maximum de leur luminosité, la magnitude absolue photographique des SNI vaut -18,7, celle des SNII -16,3 et la magnitude absolue visuelle des SNI vaut -19,9, celle des SNII -17,8. A titre de comparaison, la magnitude absolue visuelle du Soleil est égale à 4,7. Le spectre des SNI ne présente pas de raies de l'hydrogène tandis que celui des SNII en possède. Les SNI se rencontrent dans les galaxies elliptiques, irrégulières et spirales tandis que les SNII ne se rencontrent que dans les galaxies spirales.

A l'heure actuelle, on a répertorié près de 500 supernovae, dont certaines dans des galaxies très lointaines. Zwicky avait d'abord pensé qu'il y avait une supernova par galaxie tous les quatre ou cinq siècles. Actuellement on estime que leur fréquence est d'environ une par galaxie tous les vingt ou trente ans.

Dans notre Galaxie, depuis environ deux mille ans, on en a observé un certain nombre. N'oublions pas que, bien qu'une supernova soit extrêmement brillante, elle peut être cachée par des nuages de matière interstellaire, ce qui explique le nombre relativement faible de supernovae 'historiques' en regard de leur fréquence théorique d'apparition.

Les supernovae historiques - En 185, une supernova a été observée par les Chinois dans le Centaure. En 386 et en 393, les Chinois ont noté la présence subite d'une étoile brillante, respectivement dans le Sagittaire et dans le Scorpion. Il est possible que ces événements soient des explosions de supernovae.

En 1006, une supernova explose dans le Scorpion : le phénomène est noté par les Chinois, les Arabes et les moines du monastère de Saint-Gall. En 1054, l'explosion d'une supernova est attesté par des textes chinois et japonais, près de l'étoile du Taureau. Elle est célèbre car on observe aujourd'hui ses restes qui forment la nébuleuse du Crabe.

En 1572, Tycho Brahé observe une supernova dans Cassiopee. Il agit déjà en scientifique moderne et note la variation de sa luminosité en fonction du temps.

En 1604, une supernova explose aux confins des constellations du Scorpion et d'Ophiuchus. Cette fois-ci, c'est Képler qui l'observe (Tycho Brahé est mort) et, lui aussi, consigne la variation de sa luminosité en fonction du temps.

Enfin, au environs de 1667, une supernova dut exploser dans la constellation de Cassiopee. Elle passa inaperçue. Elle n'est connue que par ses restes dont la vitesse d'expansion a permis d'obtenir la date approximative de l'explosion.

Baade a pu reconstituer les courbes de lumière des supernovae de 1054, 1572 et 1604. La première est une SNII et les deux dernières sont des SNI.

Le 23 février 1987, à 7H36 (TU) se produisait un événement d'une importance exceptionnelle pour l'astronomie: l'arrivée sur la Terre des premiers indices de l'explosion d'une supernova dans le Grand Nuage de Magellan. Ces premiers indices étaient des neutrinos captés par des détecteurs. Le Grand Nuage de Magellan est une petite galaxie faisant partie de la proche banlieue de la notre : il est situé à 160 000 années de lumière.

A l'observatoire de Las Campanas, au Chili, l'astronome canadien Ian Shelton découvre la supernova sur des clichés pris le 24 février 1987 à 2H40 (TU). Un astronome amateur de Nouvelle Zélande, A. Jones la découvre aussi. Peu après, on s'aperçoit, en examinant les clichés pris par un astronome australien de l'observatoire de Siding Spring, R. Mac Naught, que l'étoile responsable de la supernova avait déjà commencé à augmenter sa luminosité 16 heures avant les observations de I. Shelton, soit trois heures après l'arrivée des neutrinos.

On baptise cette supernova du nom prosaïque de SN1987A (parce que c'est la première à avoir été observée en 1987). C'est la première fois depuis que les astronomes disposent de moyens d'observation très perfectionnés qu'une supernova explose aussi près de la Terre.

Un peu de physique - Avant de décrire ce qui se passe à l'intérieur des étoiles, introduisons quelques notions de physique indispensables à notre propos.

Dans l'Univers on peut classer les forces agissant sur les corps matériels en quatre types.

L'interaction gravitationnelle. Elle agit sur tous les corps. La force de gravitation entre corps de faibles masses est tout à fait négligeable. Par contre sa portée est infinie (elle est proportionnelle à l'inverse du carré de la distance entre les deux corps interagissant) et elle joue un rôle prépondérant dans l'Univers : c'est l'interaction gravitationnelle qui est responsable de la pesanteur, qui gouverne le mouvement des planètes dans le système solaire, celui des étoiles et des nuages gazeux dans les galaxies, celui des galaxies dans les amas de galaxies,...

L'interaction électromagnétique. Elle n'agit que sur les corps chargés. Elle est attractive entre charges de signes opposés, répulsive entre charges de même signe. Elle est responsable de la formation des atomes et des molécules, de la cohésion de la matière solide, etc. Sa portée est aussi infinie.

L'interaction nucléaire forte est la plus forte de toutes mais sa portée est très courte, de l'ordre de 10^{-15} m, inférieure à la taille d'un noyau atomique. Elle est responsable de la cohésion entre les protons et les neutrons qui constituent un tel noyau atomique, ce qui explique la difficulté qu'il y a à briser un noyau.

L'interaction nucléaire faible a aussi une très courte portée. Elle est environ 10^8 fois plus faible que la précédente et elle est responsable de phénomènes tels que la radioactivité Béta.

Aux températures de la vie courante les neutrons, les protons et les électrons sont organisés en atomes et les atomes se groupent en molécules. Un atome est constitué d'un noyau formé de neutrons et de protons (ces deux particules sont appelées pour cette raison nucléons) autour duquel se trouvent en orbite un ou plusieurs électrons. La masse d'un électron vaut $9,1096 \times 10^{-25}$ Kg, celle d'un nucléon est environ 1800 fois plus grande. Aux températures beaucoup plus élevées, les molécules sont dissociées en atomes et les atomes

eux-mêmes sont scindés en noyaux et électrons : on a une matière complètement ionisée ou plasma, formé de noyaux et d'électrons. On peut considérer un plasma, même très dense, comme un gaz. En effet, ce qui caractérise un gaz par rapport aux solides et aux liquides, c'est le fait que les atomes sont très éloignés les uns des autres. Dans un plasma, les diverses particules qui le constituent peuvent être très éloignées les unes des autres bien que la densité soit grande : cela vient de ce que les atomes sont essentiellement formés de vide, leur taille étant de l'ordre de 10^{-10}m tandis que les noyaux ont un rayon inférieur à 10^{-14}m . Enfin, rappelons que dans un gaz, donc dans un plasma, la pression est due à l'agitation des particules qui le constituent et que, dans un gaz parfait et dans un plasma, la pression est proportionnelle à la température.

Nous utiliserons souvent comme unité de masse la masse du Soleil: $1M_{\odot} = 1.9891 \times 10^{30}\text{Kg}$.

Nous désignerons par c ($\approx 300\,000\text{Km/s}$) la vitesse de la lumière dans le vide.

La fusion de l'hydrogène en hélium dans les étoiles - Rappelons que les étoiles naissent de la contraction de nuages de matière interstellaire (formés principalement d'hydrogène, ils comportent aussi de l'hélium et une faible quantité d'éléments plus lourds) : lorsqu'un tel nuage, par suite d'une instabilité, se contracte sous l'effet de la force de gravitation, sa température centrale augmente et atteint une valeur d'autant plus élevée que la masse du nuage est plus grande. A ces températures élevées, les atomes sont, ainsi que nous l'avons dit plus haut, dissociés en noyaux et en électrons. Les vitesses de ces particules croissent avec la température (puisque cette dernière n'est autre qu'une mesure de l'agitation thermique des particules). Lorsque la température dépasse dix millions de degrés, les vitesses mutuelles des particules sont de l'ordre de quelques milliers de Km/s . Comme, de plus, la densité est assez grande il est aisé d'imaginer qu'il doit se produire de nombreuses collisions entre noyaux. Mais ceux-ci portent des charges positives et la force électrostatique les fait se repousser mutuellement de sorte que, la plupart du temps, une collision entre noyaux se solde par une déviation de leur trajectoire. Même dans le cas de noyaux d'hydrogène qui sont de loin les plus nombreux et qui sont les moins chargés puisque constitués d'un unique proton, l'énergie qu'ils possèdent en moyenne à la température de dix millions de degrés est très inférieure (plus de mille fois) à l'énergie qui serait nécessaire pour vaincre la répulsion électrostatique.

Cependant un phénomène relevant de la mécanique quantique - l'effet tunnel - permet à certains protons très énergétiques de franchir la barrière de potentiel électrostatique et de fusionner en noyaux de deutérium (c'est le cas d'environ un proton sur 10^8 dans le centre du Soleil). Que s'est-il passé exactement? Une fois "franchie" la barrière électrostatique, les protons ont pu se rapprocher suffisamment pour se trouver soumis à l'interaction nucléaire forte. L'interaction nucléaire faible transforme l'un des protons en neutron (avec émission d'un positron) et le résultat est un noyau de deutérium. Ensuite le noyau de deutérium fusionne avec un autre proton pour donner un noyau d'hélium3 et

deux noyaux d'hélium³ se transforment en un noyau d'hélium⁴ (l'hélium "ordinaire") et deux protons. Si l'on fait le bilan de ces réactions qui, en résumé, ont abouti à la production d'un noyau d'hélium à partir de quatre noyaux d'hydrogène, on s'aperçoit que la masse finale est légèrement inférieure (0.7%) à la masse initiale. Cette différence de masse Δm a été transformée en énergie, conformément à la relation d'Einstein $E = \Delta mc^2$, sous la forme d'un photon gamma.

Dans les étoiles de petite taille, comme le Soleil, c'est cette série de réactions dite "proton-proton" qui est prépondérante dans la fusion de l'hydrogène en hélium. Dans les étoiles plus massives, c'est une autre série de réactions qui prédomine dans la fusion de l'hydrogène en hélium : elle aboutit également à la production d'un noyau d'hélium à l'aide de quatre noyaux d'hydrogène avec dégagement de photons gamma. Elle utilise le carbone, l'azote et l'oxygène comme catalyseurs et elle est, pour cette raison, appelée cycle CNO. C'est le physicien allemand Hans Bethe qui découvrit le cycle CNO en 1938. Cela lui valut, beaucoup plus tard (en 1967), le prix nobel.

Pour les lecteurs que cela intéresse, voici les détails de ces réactions.

Cycle proton-proton $H1+H1 \rightarrow D2+e^++\nu$ (ν : neutrino)
 $D2+H1 \rightarrow He3+\text{gamma}$
 $He3+He3 \rightarrow He4+H1+H1$

Cycle CNO $C12+H1 \rightarrow N13+\text{gamma}$
 $N13 \rightarrow c13+e^++\nu$
 $C13+H1 \rightarrow N14+\text{gamma}$
 $N14+H1 \rightarrow O15+\text{gamma}$
 $O15 \rightarrow N15+e^++\text{gamma}$
 $N15+H1 \rightarrow C12+He4$

Les diverses phases de la vie d'une étoile - Une étoile "normale" (c'est à dire où ne se produit pas de cataclysme) est en équilibre hydrostatique : la force de gravitation qui, attirant toutes les particules constituant l'étoile vers le centre de celle-ci, a tendance à faire se contracter l'étoile, à la faire s'écrouler sur elle même, est équilibrée par la pression gazeuse qui, au contraire, tend à faire se dilater l'étoile, à la faire se disperser. A la pression gazeuse on peut aussi ajouter la pression de radiation due au rayonnement mais son rôle est bien moindre. Ces deux forces, gravitation et pression, s'équilibrent constamment : par exemple, si la pression diminue, la gravitation l'emporte un moment et fait se contracter l'étoile ; mais alors la température s'élève, la pression aussi, et il arrive un instant où celle-ci devient suffisamment forte pour arrêter la contraction.

Dans une étoile comme le Soleil la combustion de l'hydrogène se déroule à 15 millions de degrés et elle dure 10 milliards d'années (nous en avons encore pour plus de 5 milliards d'années!). Dans une étoile massive, par exemple de 25 M \odot (cas qui a été bien étudié par les théoriciens), elle a lieu à 30 millions de degrés et elle ne dure que 8 millions d'années.

Donc il arrive un moment où nous avons un coeur inerte d'hélium. Les noyaux d'hélium ayant deux protons, la barrière électrostatique est bien trop forte pour qu'ils puissent fusionner aux températures régnant dans le coeur d'hélium. Celui-ci se contracte et s'échauffe. Dans le cas d'une étoile comme le Soleil, la fusion de l'hélium en carbone et en oxygène se produit lorsque la température atteint 100 millions de degrés. Elle dure 100 millions d'années. Dans le cas d'une étoile de 25 M \odot elle se produit à 150 millions de degrés et dure 500 000 ans. La couche d'hydrogène qui entoure le coeur d'hélium a été chauffé par la contraction de celui-ci, aussi l'hydrogène de cette couche fusionne-t-il en hélium. Cette combustion de l'hydrogène fait se dilater les couches supérieures de l'étoile qui, par conséquent, deviennent plus froides. La température superficielle de l'étoile descend à 3000 degrés et sa couleur vire au rouge. Dans le cas d'une étoile comme le Soleil, la température superficielle avant la dilatation était de l'ordre de 6000 degrés et la couleur était jaune. Une telle étoile est devenue une géante rouge. Dans le cas d'une étoile de 25 M \odot , la température superficielle avant la dilatation était de l'ordre de 25 000 degrés, la couleur était bleue et le rayon était de l'ordre de cinq rayons solaires. Une telle étoile est devenue une super-géante rouge dont le rayon vaut un millier de rayons solaires (presque le rayon de l'orbite de Jupiter) et dont la densité est extrêmement faible.

Dans le cas d'une étoile comme le Soleil, la température n'est pas suffisante pour que le carbone et l'oxygène (qui comportent respectivement six et huit protons) puissent fusionner. Le coeur de carbone et d'oxygène se contracte et s'échauffe. La couche d'hélium qui l'entoure, chauffée par cette contraction, se met à fusionner tandis que, plus loin du centre, il y a toujours une couche d'hydrogène qui brûle. La combustion de ces deux couches est un phénomène instable et l'énergie nucléaire dégagée expulse les couches externes de l'étoile, laissant nu le coeur de celle-ci. L'enveloppe externe va se dilater dans l'espace tandis que le coeur se refroidira lentement, devenant une naine blanche formée d'un gaz dégénéré d'électrons dont les propriétés relèvent de la physique quantique. Elles ont été étudiées par Fowler (1926). En particulier, la pression d'un tel gaz ne dépend que de la densité. Celle-ci est de l'ordre de 10⁹g/cm³. Chandrasekhar a montré en 1930 (il a eu le prix Nobel en 1983) que seules les naines blanches dont la masse est inférieure à 1,44M \odot sont stables. Cela entraîne que l'étoile dont elles proviennent avait une masse comprise environ entre 0,5 et 8 M \odot . Une naine blanche stable se refroidit très lentement jusqu'à devenir un astre mort : au bout d'un milliard d'années sa température superficielle est encore de 7500 degrés.

Envisageons maintenant notre étoile de 25M \odot . Les processus déjà décrits vont se poursuivre. Des réactions de fusion ont lieu dans le coeur de l'étoile. Lorsque ce coeur a épuisé son combustible nucléaire, il devient inerte et ne peut plus résister à la force de gravitation qui le fait se contracter. Alors sa température et sa pression augmentent ce qui a pour effet d'arrêter la contraction et de permettre aux noyaux du coeur inerte de commencer des réactions de

fusion nucléaire en noyaux plus lourds. Ces fusions successives durent de moins en moins longtemps. Durant ces étapes un phénomène important entre en ligne de compte : la production de neutrinos. Ces réactions de fusion, qui se déroulent à des températures extrêmement élevées donnent lieu à la formation de neutrinos. Le neutrino est une particule imaginée par Pauli en 1932 et détectée pour la première fois par Reines en 1956. On ne sait pas si les neutrinos ont une masse mais on sait que, s'ils en ont une, elle est très faible. Ils se déplacent à une vitesse proche de la lumière et surtout ils interagissent très peu avec les autres particules. Aussi les neutrinos produits par les réactions de fusion dans le cœur de l'étoile quittent-ils très rapidement - en quelques minutes - l'étoile, emportant avec eux une partie de l'énergie fournie par ces réactions. Il en résulte que celles-ci sont de moins en moins efficaces pour contrer la force gravitationnelle. La puissance évacuée par les neutrinos croît exponentiellement avec la température.

Voici, très sommairement, quelle est la suite de ces diverses réactions de fusion. Vers 800 millions de degrés, le carbone fusionne en néon, en sodium et en magnésium. Cette combustion dure deux cents ans. A une température de 1,2 milliards de degrés le néon fusionne en oxygène et en magnésium ; cela dure un an. A 2 milliards de degrés l'oxygène fusionne en silicium et en soufre pendant quelques mois. Enfin l'étoile arrive dans la dernière étape de sa vie qui ne va durer qu'un jour ! A 3,5 milliards de degrés, les atomes de silicium ne peuvent vaincre la barrière de potentiel électrostatique mais il y a, à cette température, des photons très énergétiques qui brisent des noyaux ; les neutrons et les protons ainsi produits vont fusionner avec d'autres noyaux, le résultat final étant la formation de noyaux de fer, l'élément le plus stable de la nature.

Pour résumer, à la fin de sa vie, notre grosse étoile présente une structure "en oignon", c'est-à-dire un noyau de fer (d'environ deux masses solaires) entouré de diverses couches concentriques qui, en allant du centre vers la périphérie, sont constituées de silicium et de soufre, d'oxygène et de magnésium, de néon et d'oxygène, de carbone et d'oxygène, d'hélium et d'azote, d'hydrogène et d'hélium.

L'explosion d'une SNI - On trouve des SNI dans les galaxies elliptiques (ainsi que dans les galaxies irrégulières et spirales). Cela entraîne que ces SNI ne peuvent pas provenir d'étoiles très massives : celles-ci, ayant une vie courte, ne sont observées que dans les galaxies où se forment des étoiles.

Or les galaxies elliptiques ne comportent pratiquement pas de gaz, donc il n'y naît point d'étoiles et elles sont constituées d'étoiles vieilles de relativement petite taille. Le meilleur candidat pour le type d'étoile responsable du phénomène SNI est la naine blanche. Nous allons voir comment une naine blanche peut donner naissance à une SNI.

Rappelons qu'une étoile double ou binaire est un couple d'étoiles suffisamment proches pour qu'il y ait interaction gravitationnelle entre elles : chacune décrit une orbite

elliptique autour du centre de gravité du couple. Lorsque les deux étoiles sont assez éloignées l'une de l'autre, elles évoluent indépendamment l'une de l'autre. Au contraire, si les étoiles sont très proches, il va se produire des transferts de matière de l'une à l'autre qui vont fortement modifier la vie des deux étoiles.

Considérons une binaire serrée formée d'une étoile de petite taille et d'une étoile massive. Celle-ci évolue vite et devient une géante ou une supergéante rouge. Quand sa taille est suffisamment grande, ses couches extérieures sont attirées par la petite étoile et elles vont tomber sur la surface de celle-ci. La grosse étoile continue cependant son évolution (ralentie par la perte de matière) et termine sa vie - suivant sa masse - en naine blanche ou en SNII. Laissons de côté ce dernier cas (nous parlerons plus loin des SNII) et envisageons le premier cas. Le fort champ gravitationnel de la naine blanche attire la matière de l'autre étoile et de l'hydrogène de cette étoile tombe sur la surface de la naine blanche. Lorsque la température de cette couche d'hydrogène devient suffisamment élevée, l'hydrogène fusionne brutalement en hélium (explosion thermonucléaire). On a là le phénomène "nova". Il se peut aussi que l'hydrogène fusionne dès son arrivée sur la naine blanche. L'hélium produit s'accumule à la surface de celle-ci, ce qui augmente sa masse, sa densité et sa température. A un moment donné la masse de la naine blanche dépasse la masse de Chandrasekhar ($1,44M_{\odot}$) et la pression du gaz d'électrons ne peut plus soutenir le poids des couches de l'étoile. Au centre de la naine blanche, la fusion des noyaux de carbone commence à une température bien inférieure (400 millions de degrés) à celle (800 millions de degrés) où cette fusion a lieu dans une étoile de $25M_{\odot}$. Cela provient de ce que, dans le gaz d'électrons très dense qui se trouve au centre de la naine blanche, les électrons atténuent la répulsion électrostatique entre les noyaux de carbone. Il y a une grosse différence avec ce qui se passerait dans une étoile "normale". Dans une telle étoile, l'énergie dégagée par les réactions de fusion augmenterait la température, donc la pression ; par conséquent le gaz se dilaterait et se refroidirait, ce qui ralentirait les réactions nucléaires. Dans le cas d'une naine blanche, nous avons affaire à un gaz dégénéré d'électrons dont nous avons dit que la pression ne dépend que de la densité ; elle est indépendante de la température. Donc l'élévation de température ne produit pas le phénomène de dilatation et refroidissement précédent. Au contraire, les réactions s'emballent et la combustion devient une explosion thermonucléaire.

La fusion nucléaire du carbone, de l'oxygène et du silicium en éléments plus lourds a lieu en une fraction de seconde au centre de la naine blanche. Il se forme en particulier du nickel 56 (instable). Puis le front de combustion - plus exactement le front de déflagration - se propage en direction de l'extérieur de l'étoile. Dans les régions périphériques où il y a du gaz "normal", la pression redevient fonction de la température : lorsque le front de déflagration parvient ici, la pression expulse les couches externes (sans qu'il y ait de combustions dans celles-ci). Elles sont suivies par les couches internes qui ont subi des combustions.

Une semaine environ après l'explosion, la luminosité de la supernova devient maximale : ce fait, a priori étonnant, est dû à la désintégration des noyaux de nickel 56 en noyaux de cobalt 56 (les couches externes sont chauffées par les photons gamma produits par ces réactions de désintégration). Puis la luminosité décroît rapidement. Enfin les noyaux de cobalt 56 se désintègrent en noyaux de fer 56 et la luminosité décroît plus lentement pendant de nombreux mois.

L'énergie totale libérée est égale à 10^{44} joules (dont 99% d'énergie cinétique et 1% d'énergie lumineuse).

L'explosion d'une SNII - Notre supergéante rouge de 25M \odot possède maintenant un coeur de noyaux de fer, très dense (100 millions de kg/dm 3) et de la taille de la Terre. Ces noyaux de fer baignent dans un gaz dégénéré d'électrons. La pression de ce gaz ne peut plus s'opposer à la force de gravitation qui fait s'écrouler le coeur de l'étoile.

Que va-t-il se passer pendant la fraction de seconde que dure cette impulsion? La contraction du coeur fait s'élever sa température. Quand elle dépasse 8×10^8 degrés, les photons très énergétiques qui existent à cette température brisent les noyaux de fer : on a une photodésintégration du fer. La densité augmentant, les électrons se trouvent au contact des protons et les transforment en neutrons: Ces réactions de neutronisation produisent des neutrons mais la densité du coeur interne est devenue telle (500 milliards de kg/dm 3) qu'il est opaque aux neutrinos et que ceux-ci y restent prisonniers. La température atteint 5×10^{10} degrés. Lorsqu'au centre du coeur la densité atteint celle des noyaux atomiques (plus de 2×10^{14} kg/dm 3), l'effondrement du coeur interne s'arrête brusquement et ce coeur interne rebondit sur lui-même. Cela produit une onde de choc qui va se propager en direction de l'extérieur. Elle va être affaiblie par la rencontre des couches de la partie externe du coeur de noyaux de fer qui s'effondrent à une vitesse proche de $c/4$. Le choc de l'onde avec les couches qui s'écroulent est suffisamment violent pour briser les noyaux de fer de ces couches. Au bout de quelques centaines de kilomètres (moins de 10^{-3} seconde après le rebond), l'onde de choc sort du coeur et se trouve à la base des couches "en oignon" qui forment la majeure partie de la masse de la supergéante rouge. Si l'onde de choc possède encore assez d'énergie - et c'est le cas pour une étoile de masse comprise entre 10 et 20M \odot -, elle pousse ces couches vers l'extérieur.

Dans le cas d'une étoile plus massive que 20M \odot , Y. Wilson a montré que ce sont les neutrinos qui vont réactiver l'onde de choc. Au cours de l'effondrement du coeur, l'énergie gravitationnelle a chauffé celui-ci jusqu'à 150 milliards de degrés. Cette chaleur va être évacuée par 10^{58} neutrinos qui vont mettre quelques secondes à quitter le coeur de l'étoile. Une petite proportion de ces neutrinos, environ 0,2%, va interagir avec les noyaux de fer des couches externes du coeur en train de s'effondrer qui se trouvent en avant de l'onde de choc affaiblie. Ces neutrinos communiquent à ces couches leur énergie et les repoussent vers l'extérieur, ce qui ravive l'onde de choc et lui permet d'atteindre la surface du coeur. Les neutrinos qui n'ont pas interagi (c'est-à-dire la très grande majorité d'entre eux) quittent l'étoile avec une vitesse proche de celle de la

lumière, emportant 99% de l'énergie libérée par l'écroulement du coeur. L'onde de choc va se propager dans les diverses couches de l'étoile, les échauffant successivement, ce qui provoque des combustions nucléaires explosives. Elle commence à traverser la couche de silicium et de soufre qu'elle échauffe à 5×10^8 degrés ce qui déclenche la nucléosynthèse explosive de noyaux de titane, vanadium, manganèse, chrome, nickel 56. Ensuite l'onde de choc traverse successivement la couche d'oxygène et de magnésium (3×10^8 degrés) avec production de silicium, soufre, chlore, arsenic, la couche de carbone et néon (1 à 2×10^8 degrés) avec production d'aluminium et de sodium, la couche d'hélium et d'azote (5×10^8 degrés) avec production d'azote et d'oxygène, la couche d'hydrogène et d'hélium (10^8 degrés) avec production de carbone et d'oxygène.

Les couches extérieures de l'étoile sont maintenant très dilatées. La température superficielle atteint 2×10^5 degrés et ces couches superficielles rayonnent des photons X : c'est le "flash X" qui dure environ une demi-heure. Puis ces couches continuent leur dilatation et, par conséquent, se refroidissent. Quand leur température s'est suffisamment abaissée, elles rayonnent dans le domaine visible : c'est alors que l'on peut "voir" la supernova. Sa taille est gigantesque, son rayon vaut environ 3,5 fois celui de l'orbite de Pluton. La luminosité décroît pendant un mois. Lorsque la température des couches superficielles a suffisamment baissé, les électrons de ces couches se combinent aux protons pour former de l'hydrogène. Cet hydrogène est plus transparent à la lumière que la matière ionisée (les électrons libres de celle-ci interagissent avec les protons) ce qui permet de voir les couches internes plus chaudes. La luminosité de la supernova va rester à peu près constante pendant quelques mois, puis va de nouveau décroître. Elle sera un peu réactivée par les réactions de désintégration du cobalt 56 (lui-même produit par la désintégration du nickel 56) dont nous avons parlé dans la description de l'explosion des SNI.

L'énergie totale libérée est égale à 10^{46} joules (dont 99% emportée par les neutrinos, 0,09% d'énergie cinétique et 0,01% d'énergie lumineuse).

Des supernovae "exotiques" - On connaît quelques supernovae qui ne présentent ni les caractéristiques des SNI ni celles des SNII. Leur spectre ne présente pas de raies de l'hydrogène, donc ce ne sont pas des SNII. Il ne présente pas non plus une raie du silicium que l'on voit dans celui des SNI. On y trouve de l'hélium, absent dans les spectres des SNI et des SNII. On a créé pour elles la classe SNIb, les SNI "classiques" formant la classe SNIa. On a élaboré divers modèles pour ces supernovae. Leur explosion semble voisine de celle des SNII. Il semble sage d'attendre de nouvelles découvertes pour décider d'un modèle sûr.

La supernova SN1987A - On a pu identifier l'étoile qui a engendré la supernova du 23 février 1987. Il s'agit de l'étoile Sanduleak-69°202 (du nom de l'auteur d'un catalogue dans lequel elle était repertoriée). C'est une supergéante bleue, de type B3 dont la température superficielle vaut environ 16 000 degrés, dont le rayon vaut 50 rayons solaires et dont la masse est de l'ordre de $20 M_{\odot}$.

Les spectres de SN1987A pris très peu de temps après l'explosion montrent les raies H alpha, H beta, et H gamma de l'hydrogène. Il n'y a donc pas de doute possible : on a affaire à une SNII, ce qui semble contredire aussitôt le scénario de l'explosion d'une SNII décrit précédemment puisque, dans celui-ci, la pré-supernova est une supergéante rouge. Il y a deux types d'explication possibles. On sait que les étoiles très massives (25 à 50M₀ ou plus) perdent leur enveloppe d'hydrogène sous l'effet du fort vent stellaire qu'elles émettent, ce qui en fait des étoiles, dites de Wolf-Rayet, montrant leur couche d'hélium mise à nu, très chaude et très lumineuse. Sk-69°202 n'était pas de ce type d'abord parce qu'elle n'était pas assez lumineuse et ensuite parce qu'il y avait de l'hydrogène dans ses couches superficielles comme l'attestent les spectres pris juste après l'explosion. Néanmoins certains astrophysiciens pensent qu'elle a perdu une bonne partie de son enveloppe d'hydrogène sous l'effet du vent stellaire passant ainsi de l'état de supergéante rouge à celui de supergéante bleue. Une observation semble corroborer leur hypothèse : le satellite IUE (International Ultraviolet Explorer) a détecté une coquille d'hydrogène enrichie en azote à une distance d'environ une année de lumière de la supernova et s'éloignant de celle-ci à une vitesse inférieure à 200 km/s. Cette explication ne satisfait pas tout le monde et on en a proposé une deuxième. La composition du Grand Nuage de Magellan est trois à quatre fois plus pauvre en éléments lourds (c'est-à-dire plus lourds que l'hydrogène et l'hélium) que celle des étoiles de notre voisinage. Il y a en particulier moins de carbone, d'azote et d'oxygène. Or nous avons vu que ces éléments servent de catalyseurs dans la fusion de l'hydrogène en hélium dans les étoiles massives (cycle CNO). Par conséquent la fusion de l'hydrogène se fait plus lentement et, comme c'est elle qui provoque la dilatation des couches superficielles de l'étoile pour la transformer en supergéante rouge, il se peut qu'elle n'y parvienne pas et que l'étoile reste bleue. La bonne explication doit peut-être tenir compte de ces deux phénomènes. L'astrophysicien théoricien Michel Cassé qui a étudié ce problème concluait en disant : "Il n'est décidément pas aisé de montrer comment une étoile de 20 Masses solaires à l'origine peut courir à la mort sous l'apparence d'une supergéante bleue".

La supernova SN1987A a montré d'autres caractéristiques inattendues. D'abord elle a été beaucoup moins lumineuse qu'une SNII normale : dix fois moins au début, environ cinq fois moins quand elle eut atteint son maximum. La luminosité de SN1987A augmenta pendant 80 jours alors que dans une SNII normale le maximum est atteint au bout d'une semaine. Le refroidissement de l'enveloppe externe en expansion qui se traduit par un changement de couleur fut cinq fois plus rapide que dans une SNII normale : elle rayonnait en ultraviolet au moment de l'explosion (15 000 degrés), dans le vert (7 000 degrés) une semaine après et dans l'orangé (5 000 degrés) au bout de trois semaines. Cela peut s'expliquer par la petite taille de l'enveloppe de SN1987A. En effet l'onde de choc a communiqué autant d'énergie à cette petite enveloppe qu'elle en aurait communiqué à la grosse enveloppe d'une supergéante rouge. Par conséquent cette petite enveloppe s'est dilatée, et donc refroidie, beaucoup plus vite que ne l'aurait fait la grosse enveloppe d'une SNII normale.

A une température donnée T la luminosité L de l'enveloppe est proportionnelle au carré de son rayon r suivant la formule $L=4.Pi.r^2.T^4$. Là encore la petitesse de l'enveloppe de SN1987A explique sa faible luminosité par rapport aux SNII normales. Enfin D. Arnett et S. Woosley ont émis l'hypothèse que l'énergie qui a permis à la luminosité de SN1987A de croître pendant près de trois mois provenait de la désintégration nickel 56 --> cobalt 56 --> fer 56 dont nous avons déjà parlé (dans les SNII normales ce phénomène passe relativement inaperçu au début à cause de la très forte luminosité). Cette hypothèse fut confirmée par la décroissance de la courbe de lumière de SN1987A après le maximum, décroissance qui fut exactement celle de la décroissance radioactive du cobalt 56 et qui est celle des SNII normales auxquelles SN1987A se décidait enfin à ressembler !

La supernova SN1987A a permis, pour la première fois, la détection de neutrinos célestes autres que solaires. En vue de déceler une éventuelle désintégration du proton, les physiciens ont conçu des détecteurs appropriés. Ce sont d'énormes piscines remplies d'eau pure et entourées de photodétecteurs susceptibles de déceler la désintégration de l'un des protons de l'eau. Ces piscines sont profondément enfouies sous terre (par exemple dans des mines ou des tunnels) pour éviter que les expériences ne soient modifiées par les rayons cosmiques. On n'a pour le moment pas encore détecté de désintégration de protons ! Par contre, ces détecteurs peuvent déceler la capture d'un neutrino par un proton. Le détecteur Kamiokande II (Japon), le détecteur IMB (Ohio) et le détecteur de Baksan (U.R.S.S.) ont enregistré la capture de 24 neutrinos venants de SN1987A (13 pour le premier, 8 pour le deuxième, 3 pour le dernier). Ces neutrinos étaient des antineutrinos électroniques auxquels ces détecteurs sont sensibles (ils sont détectés par la réaction $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e + n$). Quels renseignements ont fourni ces neutrinos ? Les neutrinos sont parvenus sur Terre le 23 février 1987 à 7h36 (TU) deux heures avant l'arrivée de l'onde de choc à la surface de l'étoile se manifestant par le rayonnement ultraviolet, puis visible. Cela indique que l'onde de choc n'a mis que deux heures pour atteindre la surface de l'étoile et cela confirme que nous avons affaire à une petite étoile car, dans le cas d'une supergéante rouge, elle aurait mis une journée. La quantité de neutrinos détectés a permis de calculer que l'énergie libérée par SN1987A était de l'ordre de 3×10^{48} joules ce qui correspond aux prévisions théoriques. A partir des temps d'arrivée des neutrinos dont les énergies étaient différentes, J. Bahcall, A. Burrows, D. Lamb et T. Loredo ont montré que si le neutrino - plus précisément, l'antineutrino électronique - a une masse, celle-ci est inférieure à 4×10^{-5} fois celle de l'électron.

Les observations dans l'infrarouge ont indiqué la présence du fer, du cobalt, du nickel, du silicium, du soufre, du chlore, de l'argon, du néon, du sodium, du magnésium, du potassium, du carbone, de l'oxygène et du calcium.

Après l'explosion - Nous n'en dirons que quelques mots, le sujet étant suffisamment vaste pour être à lui seul l'objet d'une conférence. L'enveloppe gazeuse poussée par l'explosion va continuer son expansion dans l'espace pour finir

par se fondre dans le milieu interstellaire au bout de quelques dizaines de milliers d'années. Un très bel exemple de ceci est la célèbre nébuleuse du Crabe ; elle est le reste de la supernova qui a explosé en 1054 dans notre Galaxie. Elle rayonne dans tous les domaines : radio, optique, X, gamma. Dans notre Galaxie on a détecté les restes de plus de 120 supernovae grâce à leur émission radio. Celle-ci est due au rayonnement synchrotron d'électrons relativistes spirant dans un fort champ magnétique. Cela permet de le distinguer du rayonnement radio des régions HII qui n'est pas d'origine synchrotron.

Les supernovae de type II laissent aussi, au milieu de l'enveloppe gazeuse en expansion, un résidu compact. Il s'agit d'un astre de très faible taille (quelques dizaines de km de diamètre) et dont la densité est voisine de celle de la matière nucléaire (environ 10^{14} kg/dm³). Par suite de la conservation du moment cinétique (c'est le phénomène qui fait que le patineur tourne plus vite lorsqu'il ramène ses bras vers lui), cet astre, que l'on appelle une étoile à neutrons, tourne extrêmement vite, jusqu'à 600 tours par seconde. La force centrifuge ne le fragmente pas à cause de la très grande intensité de la gravitation dans une telle étoile. La contraction de l'étoile a aussi très fortement augmenté le champ magnétique. La rotation de celui-ci crée un champ électrique extrêmement intense (on a une sorte de dynamo !) qui arrache des électrons à la surface de l'étoile. Ces électrons vont émettre un rayonnement synchrotron en spirant dans les lignes du champ magnétique. L'axe du champ magnétique étant distinct de l'axe de rotation de l'étoile, le rayonnement que nous recevons sera périodique : nous avons là un pulsar. Le premier pulsar fut découvert en 1967 confirmant l'existence des étoiles à neutrons prévue théoriquement par Oppenheimer dès 1938. De nos jours on connaît 437 pulsars dans notre Galaxie.

Si la masse de l'étoile à neutrons dépasse $3M_{\odot}$ l'écroulement gravitationnel devrait continuer et donner naissance à un trou noir.

Bibliographie

- L. Alloin, E. Schatzman, La supernova 1987A, La Recherche N°194, décembre 1987.
- Astronomie, sous la direction d'E. Schatzman, Encyclopédie de la Pléiade, 1982.
- L'Astronomie Flammarion, tomes 1 et 2, sous la direction de J.C. Pecker, 1985.
- Atlas d'astronomie, Ed. Stock, 1976.
- P. Bakouline, E. Kononovitch, V. Moroz, Astronomie générale, Editions de Moscou, 1975.
- J.L. Basdevant, R. Mochkovitch, AA. Vidal-Madjar, La supernova des temps modernes, le courrier du C.N.R.S. 1988.
- C. Bertaud, les supernovae, l'Astronomie mars 1961.
- H. Bethe, G. Brown, L'explosion d'une supernova, pour la science N°93, juillet 1985.
- M. Cassé, R. Mochkovitch, A. Vidal-Madjar, La supernova du siècle, la recherche N°189, juin 1987.
- M. Dennefeld, La supernova 1987A dans le Grand Nuage de Magellan, L'Astronomie novembre 1987.

- M. Dennefeld, R. Ferlet, J.L. Masnov, La supernova du Grand Nuage de Magellan, L'Astronomie juin 1987.
- Dossier sur la supernova de 1987 dans le Grand Nuage de Magellan (nombreux articles de D. Alloin, J. Audouze, M. Cassé, A. Chalabaev, M. Dennefeld, R. Mochkivitch, R. Schaeffer), L'Astronomie juin 1988 et juillet-août 1988.
- Les étoiles, le système solaire, encyclopédie scientifique de l'Univers du Bureau des longitudes, Ed. Gauthier-Villars, 1979.
- R. Ferlet, La supernova du Grand Nuage de Magellan, L'Astronomie avril 1987.
- P. Gorenstein, F. Seward, W. Tucker, Les restes des supernovae récentes, Pour la science N°96, octobre 1985.
- L. Gouguenheim, Méthodes de l'astrophysique, Collection liaisons scientifiques, Ed. Hachette C.N.R.S. 1981.
- R. Harkness, C. Wheeler, Les supernovae riches en hélium, Pour la science N°123, janvier 1988.
- A. Hewish, Les pulsars, L'Astronomie février 1971.
- Histoire de l'Univers, sous la direction d'A. Hayli, Ed. Hachette 1980.
- D'après R.N. Manchester et J.H. Taylor, Une liste de pulsars, L'Astronomie mai 1976.
- T. Montmerle, N. Prantzos. Soleils éclatés, les supernovae, Ed. Presses du C.N.R.S. 1988.
- J.P. Parisot, La supernova de 1054, un mythe? L'Astronomie juillet-août 1982.
- M. Petit, les étoiles variables, Ed. Masson 1982.
- P. Simon, Les supernovae du Centenaire, L'Astronomie avril 1987.
- E. Surraud, L'explosion des étoiles, La Recherche N°186, mars 1987.
- T. Weaver, S. Woosley, La grande supernova de 1987, Pour la science N°144, octobre 1989.

FRED HOYLE

La théorie de l'univers stationnaire

Né en 1915, Fred Hoyle a vécu son enfance dans le Yorkshire près des cités industrielles de Leeds et de Bradford. Elevé par sa mère institutrice, l'enfant présente très vite des dispositions pour les mathématiques que l'enseignement traditionnel ne lui permet pas d'exploiter. Grâce à une modeste bourse, Hoyle put néanmoins fréquenter une école de bon niveau. C'est à cette époque qu'il commença à lire des ouvrages scientifiques et à prendre conscience de l'importance des mathématiques. Encouragé par Allen Smailes, professeur à Cambridge, il réussit son admission à la faculté de Mathématiques.

Malgré des débuts difficiles au milieu d'étudiants mieux préparés, Hoyle se range vite dans le peloton de tête de sa classe.

Il fréquente alors des sommités scientifiques de réputation mondiale. Il fut considérablement influencé par un de ses professeurs Paul Dirac, prix Nobel. Son nom commence alors à apparaître dans les revues scientifiques : Il débute ainsi sa brillante carrière de savant atomiste.

C'est à cette époque que furent découvertes les propriétés de la fission nucléaire. Profondément révolté par les applications possibles sur le plan militaire, il décida d'abandonner la physique nucléaire. Sa rencontre avec Lyttleton oriente sa carrière vers une science plus pacifique : l'Astronomie.

Les hasards de la guerre favorisèrent une rencontre déterminante : celle de Hoyle, Gold et Bondi. Elle allait aboutir, cinq ans plus tard, à l'élaboration de la théorie de l'Univers stationnaire, s'opposant ainsi à l'idée d'explosion originelle (Big-Bang) .

BIG-BANG

Explosion originelle

Expansion. (Fuites des galaxies). Diminution de la densité.

UNIVERS STATIONNAIRE

Infini dans le passé.

Expansion par création continue de matière. Conservation de la densité

Deux théories s'affrontent

L'Univers stationnaire.

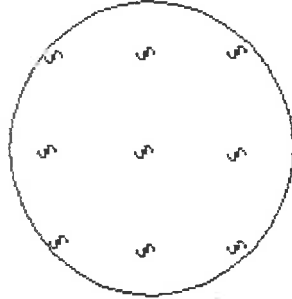
Univers infini dans le passé comme dans le futur, il apparaît le même pour tout observateur et à tout temps.

L'augmentation de l'espace dû à l'expansion est compensée par la création continue de matière (à raison de deux atomes d'hydrogène par km^3 et par an) de manière à maintenir la même densité.

Expansion type Big-Bang



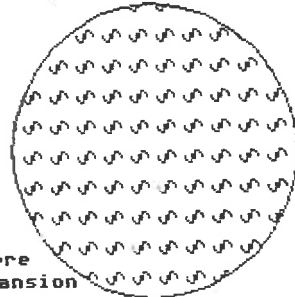
L'espace se dilue



Expansion avec création de matière



La création de matière comble l'espace créé par l'expansion



Pendant une vingtaine d'année les deux théories s'affrontèrent avec un rare acharnement.

En 1953, la théorie de Hoyle Gold et Bondi subit une première attaque sérieuse : Les premières mesures donnaient un décalage spectral (Red Shift) trop accentué pour les galaxies très éloignées. La théorie allait être abandonnée quand de nouvelles mesures mirent en évidence les erreurs d'observation. Le décalage spectral concordait alors avec les observations. Toutefois, après cette première attaque, un doute subsista quelques temps parmi le monde scientifique.

Réconfortés un temps par une mauvaise estimation de l'âge de l'univers, ils devaient déchanter quand Baade, en 1955, réctifia les calculs de la constante de Hubble. Précédement agé de 2,5 milliards d'années, l'univers venait de passer la barre des 5 milliards d'années. (Les études géologiques donnaient l'âge de la Terre supérieur à 2,5 milliards d'années.)

La radio-astronomie, nouvellement créée, permit dès 1960 la découverte et l'étude des Quasars; ces objets faisaient apparaître des événements d'une rare violence dans le lointain passé du Cosmos. Ce qui entre en contradiction avec la théorie d'un Univers devant apparaître le même pour tout observateur et à tout temps.

En 1964, la découverte du rayonnement fossile (3°K) par Penzias et Wilson sonna le glas de la théorie de l'Univers stationnaire. En effet, la théorie du Big-Bang trouvait là un argument irréfutable en sa faveur. Seule une explosion initiale pouvait expliquer la présence de ce rayonnement observable également dans toutes les directions.

La meilleure conclusion reste à Fred Hoyle, qui déclarait au sujet du rayonnement à 3°K : "Dès l'annonce de cette découverte, j'ai été inquiet. J'ai senti tout de suite quelque chose de mauvais augure. Notre théorie a survécu aux crises et aux tempêtes, mais cette fois-ci je ne voie pas d'issue . Ce n'est pas encore une chose établie et prouvée, mais, pour le momment, chaque observation semble le confirmer. "

Notes de lecture

La dynamique des comètes (D. Benest, C. Froeschlé, H. Rickman; *la Recherche N°214*)

Dans la nébuleuse pré-solaire, des grains de poussière se sont agglomérés en blocs de quelques Km de diamètre, les planétésimaux. Ceux qui étaient suffisamment loin du proto-Soleil n'ont pas formé de planètes. Ils constituent un nuage sphérique d'une centaine de milliers d'U.A. de rayon, centré en le Soleil, appelé Nuage d'Oort. Ces grains de poussière sont composés de matériaux réfractaires provenant des parties externes de l'atmosphère de géantes rouges et ils se sont couverts de glace d'eau, de CO, de NH₃, etc en traversant des nuages moléculaires dans le milieu interstellaire.

Quelle est l'origine des comètes? Lorsqu'une perturbation modifie l'orbite d'un planétésimal, il se peut que celui-ci quitte le nuage d'Oort vers l'intérieur. S'il se rapproche suffisamment du Soleil, l'élévation de la température fait de lui une comète. L'article analyse en détail ce processus. Il se termine par une étude de l'évolution des comètes. En bref, on a là une excellente mise au point sur les connaissances actuelles concernant la naissance, la vie et la mort des comètes.

La structure du Petit Nuage de Magellan (E. Maurice, *L'Astronomie octobre 1989*)

Le petit nuage de Magellan (PNM) et le Grand Nuage de Magellan (GNM) sont deux petites galaxies (un milliard de masses solaires et dix milliards de masses solaires) situées respectivement à 63 Kpc et à 50 Kpc. Depuis les années 1980 on a entrepris l'étude en profondeur (c'est-à-dire dans la direction de la ligne de visée) du PNM. La répartition des vitesses radiales des objets constituant le PNM a mis en évidence que les étoiles, l'hydrogène neutre et les régions HII du PNM formaient quatre complexes appelés VL, L, H, VH, de vitesses radiales distinctes (-45, -28, 9, 30 Km/s). L'étude du milieu interstellaire du PNM a montré que le complexe L est situé, sur la ligne de visée, devant le complexe H.

L'article se termine par l'exposé des résultats de simulations numériques effectuées par des astronomes japonais et américains pour connaître l'interaction gravitationnelle entre les Nuages de Magellan et notre Galaxie.

Observatoire Astronomique de
St Genis Laval

Longitude $4^{\circ}47'06''$ Est

Latitude $+45^{\circ}41'42''$

Altitude 299 mètres

Batiment Administratif

Telescope 60cm

Telescope 1m

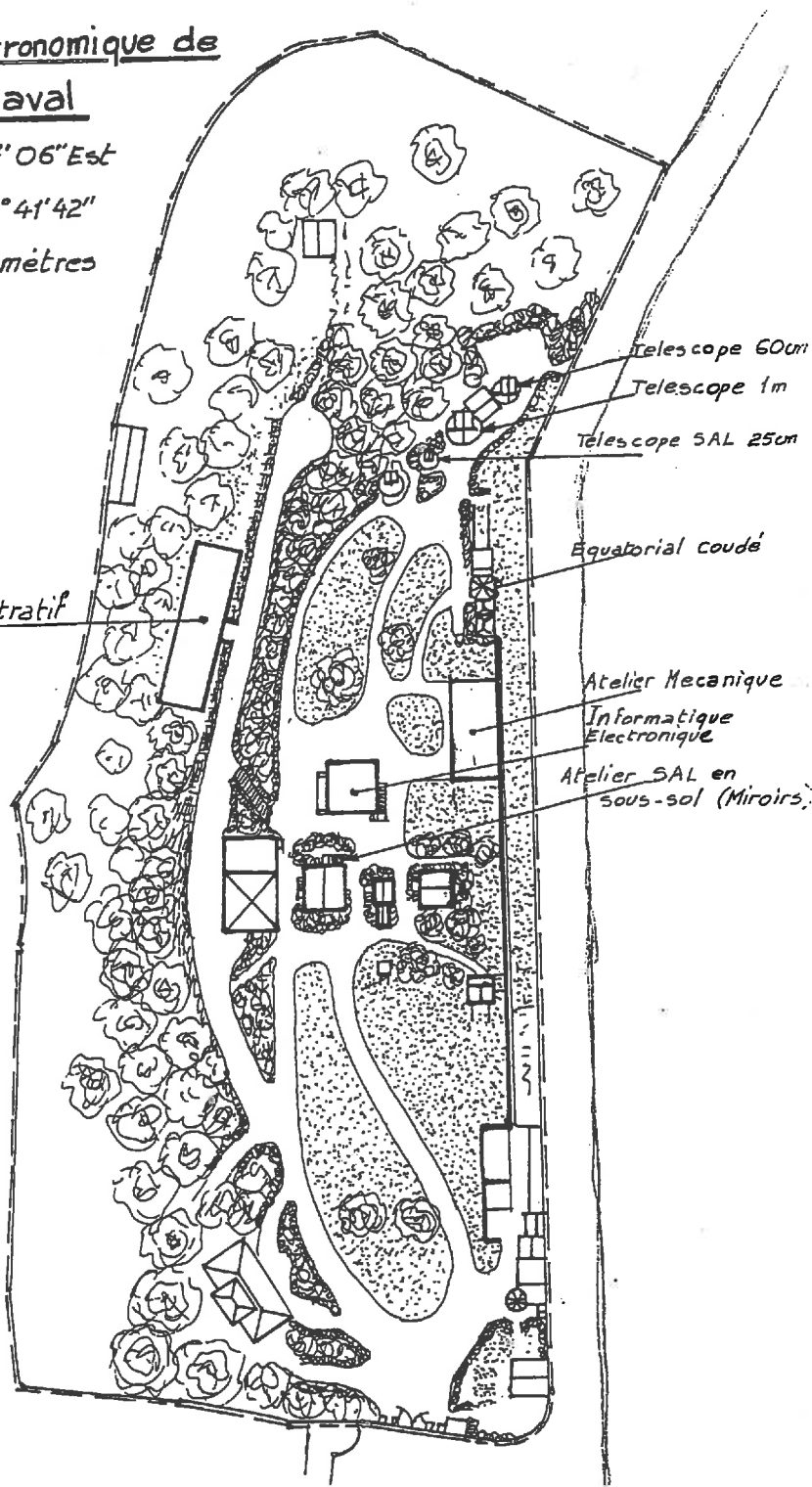
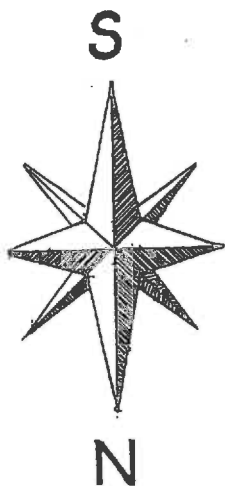
Telescope SAL 25cm

Equatorial coude

Atelier Mecanique

Informatique
Electronique

Atelier SAL en
sous-sol (Miroirs)



SOCIETE ASTRONOMIQUE DE LYON

Association sans but lucratif, régie par la loi de 1901
a succédé en 1931 à la SOCIETE ASTRONOMIQUE DU RHONE fondée en 1906

Siège social : Observatoire de Lyon - 69230 SAINT-GENIS-LAVAL
C.C.P. Lyon 1822-69 S